

## 금속 및 샌드위치 복합재 유도탄 구조체의 흡음 및 차음 특성에 관한 실험적 연구

이윤규<sup>\*,1)</sup> · 이대은<sup>1)</sup> · 진병대<sup>1)</sup> · 이동민<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 제1기술연구본부

### Experimental Study on Acoustic Absorption and Transmission Characteristics of Aluminium and Sandwich Composite Structure

Yoon-kyu Lee<sup>\*,1)</sup> · Dae-oen Lee<sup>1)</sup> · Byung-Dae Jin<sup>1)</sup> · Dong-min Lee<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> The 1st Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 19 December 2017 / Revised 23 March 2018 / Accepted 23 May 2018)

#### ABSTRACT

Recently, as the speed and performance of the launcher and the missile have been improved, it is necessary to consider the acoustic load of launching and flight in initial design step. In this paper, an experimental study on acoustic absorption and transmission characteristics of aluminium vs. sandwich composite structures were conducted. The overall noise reduction was evaluated by performing an acoustic test in the reverberation room, and the acoustic absorption and transmission loss of the structures were analyzed by conducting the sound absorption test inside the structure.

Key Words : Noise Reduction(소음 저감), Acoustic Absorption(흡음), Acoustic Transmission Loss(음향투과 손실)

#### 1. 서론

최근 유도탄이 장사정화 고속화됨에 따라, 이륙 시 추진기관에서 발생하는 음향 하중 및 비행 중 공력에 의해 발생하는 음향 하중은 내부 장비 및 비행체 구조에 가해지는 랜덤진동의 주요 원인이 된다. 이러한 랜덤 진동 및 직접 전달되는 음향하중은 기체 자체의 구조적 파손 및 내부 장비의 오작동, 회로 단락등을

일으킬 수 있다. 따라서, 고속 유도탄의 설계 시 구조 내부로 전달되는 음향하중 설계 목표에 부합되도록 차음 구조 및 음향저감 시스템 성능에 대한 설계치를 규정하고, 이를 만족시키기 위한 흡/차음 설계가 필수적이다.

본 연구에서는 유도탄 기체 재질로 주로 사용되는 알루미늄 금속 및 허니콤 샌드위치 복합재의 음향특성을 분석하고자 시험 구조체를 제작하였다. 우선, 일반 잔향실내에서 음향 시험을 수행하여 전체적인 음향저감 성능을 평가 하였고, 시험 수행 시 구조체 내부에서의 흡음률을 별도 시험을 통해 추출하여 구조

\* Corresponding author, E-mail: lyk@add.re.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

체의 흡음 및 차음성을 분석하였다. 이는 추후 유도탄 구조 음향 설계 시 필요한 기초데이터로 활용될 수 있을 것이다.

대형 발사체의 경우에는 내부 페이로드 및 탑재 위성을 보호하기 위한 흡차음 설계 및 고에너지 음향 시험시설에서의 시험평가가 다수 수행되어 왔다<sup>1-2)</sup>. 그러나 유도탄의 경우에는 개발 기간 및 환경 특성에 의해 모든 유도탄에 대한 고에너지 음향환경시험이 불가하다. 본 논문에서는 음향저감 설계를 위한 기초데이터 확보뿐만 아니라, 일반 스피커 가진을 이용한 일반 잔향실(Acoustic Reverberation Chamber, 이하 ARC) 내에서의 시험 결과와 동일 구조체에 대한 고에너지 잔향실(High Intensity Acoustic Reverberation Chamber, 이하 HIARC) 시험결과를 비교함으로써 유도탄 설계 시 일반 잔향실 시험을 통해 음향저감 성능을 추출해 내는 가능성을 평가하였다.

## 2. 음향 시험의 구성

본 장에서는 구조체의 음향 성능과 관련된 매개변수 및 이론에 대하여 간략히 소개하고 잔향실을 이용하여 수행된 음향 시험 방법에 대하여 기술하도록 한다.

### 2.1 음향 성능 매개 변수

일반적으로 알려진 음향 저감 성능을 평가 하는 매개 변수는 삽입손실, 음압감소 그리고 투과손실 등이 있다.

#### 2.1.1 삽입 손실

(Insertion Loss, ASTM E2964-14)

삽입 손실은 시험대상체의 유무에 따른 음압의 차이를 분석한 값으로 음압레벨의 차로 표현한다. 즉 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 동일 소음원에 대해 적색원으로 표기된 음향차폐구조가 없는 경우(A)와 있는 경우(B) 내부 수음부(Pt1~6)에서의 dB로 표현된 평균음압(SPL)의 대수차로 표현된다.

$$Insertion Loss : IL = P_{w/o Acoustic wall} - P_{w Acoustic wall} \quad (1)$$

삽입손실은 Fig. 1. B의 내/외부 음압차와는 다른 개념이며 다른 값을 갖는다. 이는 음향 차폐구조의 유무

에 따라 외부 음압도 차이가 발생하기 때문이다. 즉, IL 값은 음향차폐 시스템의 유무에 따른 음압의 절대적 차이값을 보여주어 직관적이기는 하다. 그러나 시험 시 시험 환경 및 입력값에 따라 바뀌는 값으로 음향저감시스템 또는 구조체를 설계하는데 적용하기에는 부적합한 개념으로 본 연구에서는 잔향실의 균질성 확인에만 활용 하도록 한다.

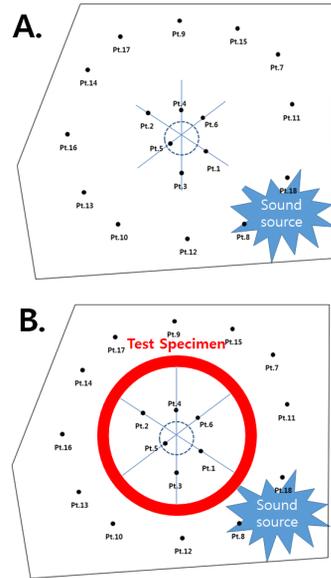


Fig. 1. Insertion loss test setting

#### 2.1.2 음압 감소

(Noise Resuction Level dB, ASTM E596-96) 음향 하중저감 성능을 나타내는 음압저감도 또는 음압감소(이하 NR, Noise Reduction)는 다음의 식 (2)와 Fig. 1.B 에 도시된 시험대상체의 내/외부 음압레벨의 차로 표현한다.

$$NR = L_{outside} - L_{\in side} = 20 \log \left| \frac{P_{outside}}{P_{\in side}} \right| (dB) \quad (2)$$

$L_{outside}$  : 구조체 외부 Averaged SPL

$L_{\in side}$  : 구조체 내부 Averaged SPL

음압 감소는 삽입손실과는 물리량은 같으나 다른 개념으로 본 연구에서의 비행 구조체 내외부의 음압 차로 정의하여 음향 하중이 저감되는 정도 즉, 음향하중저감 성능을 표현하기에 적합한 매개변수이다.

2.1.3 투과 손실

(Transmission Loss, ASTM E90-8262)

구조체에 투과되는 음향인텐시티의 비로서 투과손실값은 삽입손실값과 다르게 물리량이 음압이 아닌 음향차폐(SWL, Sound Power Level)를 다루고 있으며, 음향차폐 시스템 자체의 고유특성을 나타내주는 값이다. 즉, 음향차폐 시스템은 재료의 선택 및 시스템의 초기 설계 시에는 일반적으로 투과손실계수를 매개변수로 설계하는 것이 일반적이다. 다만, 투과율만을 고려하므로 식 (3)에서 보이는 바와 같이 내외부의 음압차에서 내부흡음효과를 제하여야 한다.

$$TL = L_{p1} - L_{p2} - 10 \log (A/S) \tag{3}$$

$L_{p1}$  : 입사된 Averaged SPL [기체 외부]

$L_{p2}$  : 투과된 Averaged SPL [기체 내부]

$S$  : 시편 면적

$A$  : 수음부등가 흡음 면적 [기체 내부]

$$A = \frac{55.3 V}{c T_{60}}$$

$V$  : 공간의 체적

$T_{60}$  : 음장의 정상상태로부터 60dB 감소하는데 걸리는 시간

2.2 음향 시험 방법

본 연구에서 구조체의 음향 저감 성능 평가를 위해 수행된 잔향실 시험은 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 일반 스피커 가진에 의해 약 OASPL 110 dB까지 음향 가진이 가능한 한국기계연구원(이하 KIMM)내의 잔향실을 사용하여 시험을 수행하였다.

시험대상체는 유도탄 구조체로 주로 사용되는 알루미늄(aluminium) 재질과 허니콤 복합재(Honey-comb composite) 구조체에 대해 실험을 수행하였다.

2.2.1 잔향실 내부 음향 균질성 확인 시험.

우선, Fig. 2에서 보이는 구성으로 잔향실 내부 측정지점에서의 음향측정을 수행한 후 삽입손실 값을 분석하여 음향 균질성을 확인하는 예비시험을 수행하였다.

그 결과 시험이 수행된 잔향실은 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 균질성이 ±1 dB 이하의 값을 갖는 200 Hz 이상의 음향 데이터를 신뢰할 수 있는 값을 파악하였다.



Fig. 2. SPL difference test of ARC

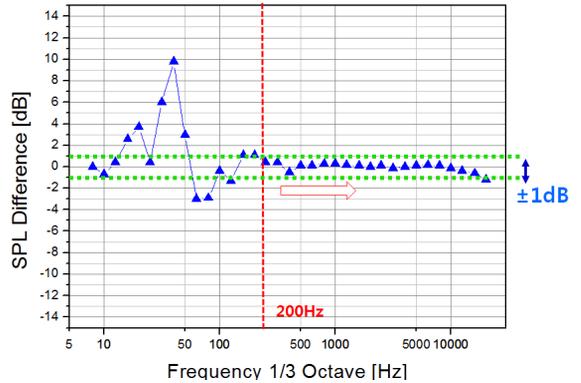


Fig. 3. SPL difference test result of ARC

2.2.2 구조체 내부 흡음률 측정 시험.

2.1장에서 언급하였듯이 투과 손실을 잔향실 시험을 통해 계산하기 위해서는 내부 흡음효과를 제하여야 한다. 본 연구에서는 Fig. 4에서 보이는 바와 같이 구조체 내부에 스피커를 위치시키고 정상상태의 음향 가진 후 스피커 가진을 정지하여 -60 dB까지 음압레벨 (Sound Pressure Level, 이하 SPL)이 감소하는 시간( $T_{60}$ )을 측정하였다.  $T_{60}$ 을 식 (3)의 A(등가흡음면적, sabine reverberation formula<sup>[3])에 적용하여 구조체 내부의 흡음 성능을 계산할 수 있다.</sup>



Fig. 4. T60 measurement test

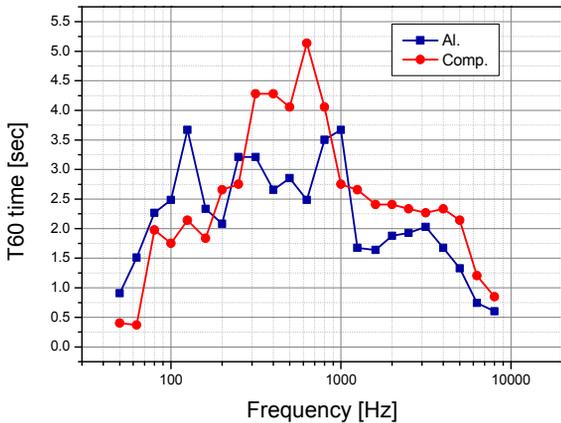


Fig. 5. Results of T60 measurements

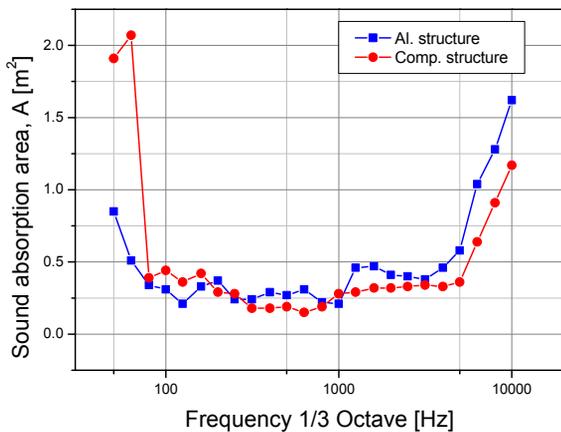


Fig. 6. Results of absorption area calculation

Fig. 5와 6에 T60 측정 결과와 흡음성능을 나타내는 등가흡음면적을 도시하였다. 등가흡음면적 및 T60 선도에서는 알루미늄 구조체가 약간 높은 값을 가지지만, 전체적인 흡음 성능은 두 재료의 구조체가 거의 동일한 수준이라고 판단 할 수 있다.

### 2.2.3 잔향실을 이용한 음향 가진 시험

잔향실의 균질성 확인 시험 및 구조체 내부의 잔향 시간 측정 시험을 완료 한 후 Fig. 1. B와 Fig. 7에서 보이는 바와 같이 구조체 외부에서 음향 가진 후 구조체 내외부의 음압계측시험을 수행하였다. 음향측정은 구조체 내부 6ch. 외부 12ch.의 마이크로폰 적용하여 계측하였다.



Fig. 7. Reverberation chamber test

Fig. 8은 복합재 기체와 알루미늄 금속재 기체의 내외부 음압을 도시하고 있다. ■와 □로 도시된 외부 음향 가진 SPL을 비교하여 보면 동일 출력으로 스피커 가진하여도 시험 시 환경 조건에 의해 음향 가진 수준의 차이를 보임을 알 수 있다. 즉, 구조체의 음향저감 성능과약을 위해서는 내/외부 음압 감소 및 투과 손실을 분석함으로써 정량적인 비교가 가능하다.

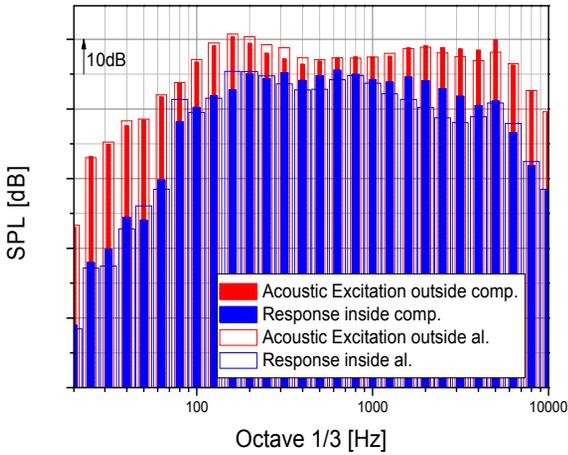


Fig. 8. Acoustic test of Comp. and al. structure.

### 3. 음향 시험 결과

본 장에서는 두 재료의 구조체에 대한 음향 시험 결과를 주파수 대역별로 분석하였다. 또한 일반잔향실시험(ARC)과 고에너지 잔향실(HIARC)시험결과를 비교함으로써 유도탄 구조체의 초기 음향 설계 시 고려해야 할 사항에 대해서도 논하도록 한다. 음향 저감 성능과 관련된 매개변수는 2장에서 언급한 음압감소와 투과 손실을 주로 다루도록 한다.

#### 3.1 일반잔향실(ARC) 시험 결과

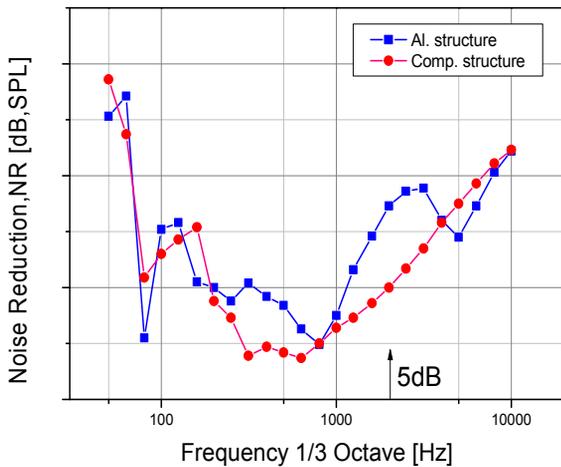


Fig. 9. Noise reduction comparison Al. vs. Comp.

Table 1. Results of Noise reduction measurements

재질	NR ( $\Delta$ OASPL)
Aluminium	10.7
Honeycomb Composite	9.2

Table 1과 Fig. 9를 종합하여 보면 유도탄의 외피 구조에 의해 외부 음향하중에 대해 OASPL 기준 9 dB 이상 음향 저감효과가 있음을 알 수 있다. 잔향실험특성에 의한 차단 주파수 200 Hz 이상의 값을 분석하여 보면, 전반적으로 비중량이 높은 알루미늄 구조체의 음향 저감 효과가 복합재 구조체에 비해 다소 우수하였다.

투과 손실(차폐성능)은 Fig. 10에서 보이는 바와 같이 단위 면적당 중량이 큰 알루미늄 구조체가 좋은 성능을 보였다. 다만, Fig. 10의 4000 Hz 이상에서 알루미늄 구조체의 투과 손실 값이 갑자기 떨어지는 것은 식 (4)와 Table 2에 보이는 바와 같이 Coincidence 현상에 의함이며 이는 구조체의 음향 설계 시 반드시 고려하여야 할 사항이다. 또한 복합재 구조체도 Fig. 10에 표기된 바와 같이 Coincidence 현상과 식 (6)의 Ring mode 현상에 의해 투과 손실이 다소 감소하는 경향을 보여 주었다<sup>4)</sup>.

Coincidence Frequency (4)

$$F_c = \frac{C^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m'}{D}}$$

$$m' = \rho t$$

Flexural stiffness (rigidity) of Plate

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$$

Honeycomb sandwich plate (double wall)

Mass - spring - mass resonance frequency (5)

$$F_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E_c}{t_c m}}$$

$m$  = surface mass of the plate

$E_c$  = young's modulus of honeycomb core

$t_c$  = thickness of core

Ring mode frequency of cylinder (6)

$$F_{ring} = \frac{1}{2\pi r} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

$E$  = young's modulus

$r$  = radius of cylinder

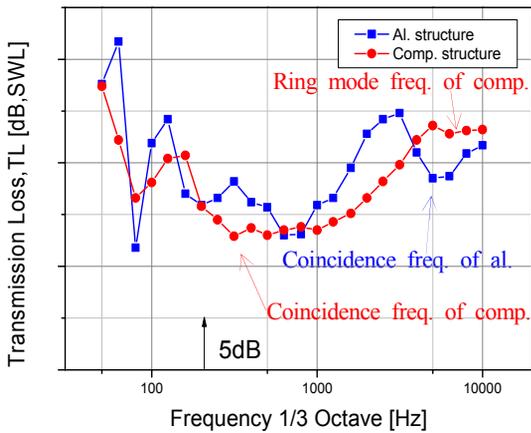
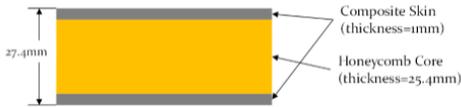


Fig. 10. Transmission Loss comparison Al. vs. Comp.

#1 Composite Sandwich skin (27.4mm)



Carbon Fabric Prepreg  $\rho(\text{kg/m}^3) = 1550$   
 Honeycomb Core  $\rho(\text{kg/m}^3) = 65.68$   
 단위 면적당 중량 =  $1.978 \text{ kg/m}^2$

#2 Aluminum skin (2.54mm)

AL2014-T6  $\rho(\text{kg/m}^3) = 2795.67$   
 단위 면적당 중량 =  $7.101 \text{ kg/m}^2$

Fig. 11. Comparison of al. vs. comp. mass distribution for unit area

Table 2. Coincidence frequency and Double-wall frequency of al. and sandwich comp. structure

재질	$F_c$	$F_o$	$F_{ring}$
Aluminium	4.9 kHz	-	0.9 kHz
Honycom. Composite	302 Hz	40.5 kHz	6 kHz

Fig. 10과 11에서 보이는 바와 같이 Coincidence 현상과 실린더의 Ring mode가 발생하는 주파수 대역에서 음향저감능성이 감소하는 경향을 실험을 통해 확인할 수 있었다. 알루미늄 구조체의 투과손실과 음압 감소 모두 복합재구조체에 비해 다소 높게 측정되었

으나, 전체 음압감소(OASPL)로는 큰 차이를 보이지 않았다.

3.2 고에너지 잔향실(HIARC) 시험 결과

일반잔향실 시험 결과와 고에너지 음향 시험 결과를 비교하여 다음의 Fig. 12~15(Y축의 1구간값은 5 dB를 나타냄)에 도시하였다. 그 결과 Coincidence 현상에 의해 복합재 기체는 300 Hz 대역, 그리고 금속재 기체는 링모드가 나타나는 900 Hz 대역부터 Coincidence 현상에 의한 5000 Hz의 고주파 구간에서 고에너지 시험의 값이 낮게 관찰되었다.

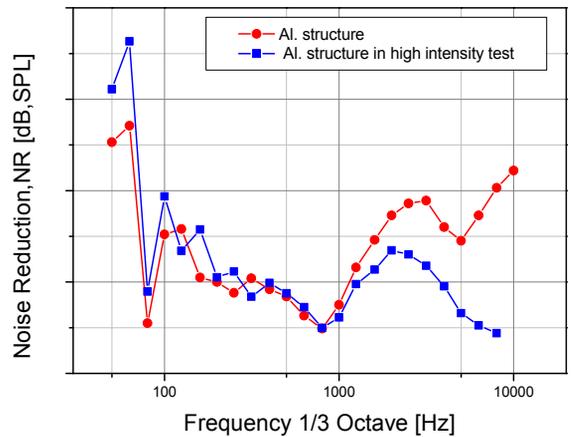


Fig. 12. NR comparison ARC vs. HIARC. test for al. structure

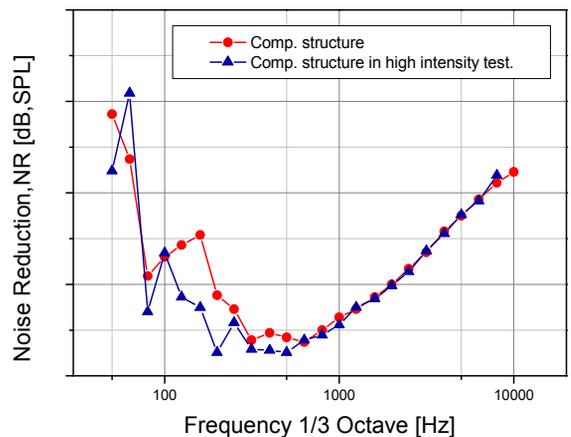


Fig. 13. NR comparison ARC vs. HIARC. test for com p. structure

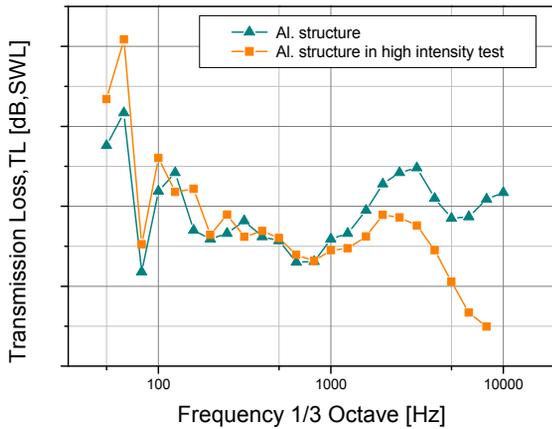


Fig. 14. TL comparison ARC vs. HIARC. test for al. structure

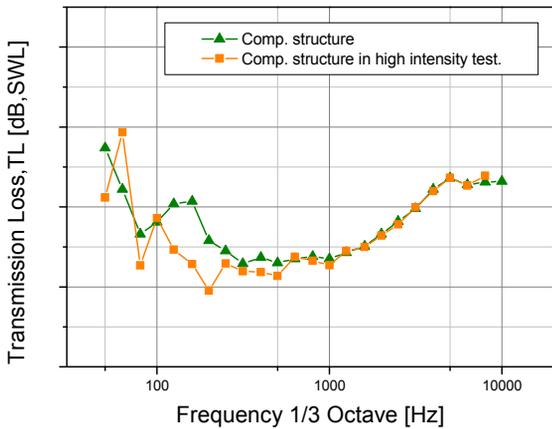


Fig. 15. TL comparison ARC vs. HIARC. test for comp. structure

#### 4. 결론

본 연구에서는 유도탄 구조재료로 주로 쓰이는 알루미늄 금속재와 허니콤 복합재 시험구조체에 대한 음향 시험을 수행하여 유도탄 구조 초기 설계 시 음향관련 설계에 대한 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 음향저감 시스템이 적용하지 않은 구조체만으로는 현 시험체 기준 외부 음향환경에 대해 OASPL 9~10 dB의 음향을 저감 할 수 있다. 즉, 유도탄 초기 설계 시 질량법칙에 의해 계산되는 구조의 두께 또는 비중량이 높은 재료의 선택을 통해 음향

저감 효과를 예상하여 설계 가능하다.

- (2) 금속재와 샌드위치 복합재 구조체에 대한 음향 시험을 비교분석한 결과, 비중량이 작은 복합재가 음향투과손실 및 음압감소는 다소 낮게 예측되었다. 그러나, 전체적인 음압감소 지표인 OASPL은 약 1 dB의 작은 차이의 결과를 보임으로, 경량설계(복합재 구조체가 동일한 기체형상기준으로 중량 1/3 수준으로 경량화 가능) 및 음향 하중설계 관점에서 금속재보다 복합재 구조를 사용함이 더 효과적인 것으로 판단된다.
- (3) 일반잔향실 시험 결과와 고에너지 잔향실 시험 결과를 비교한 결과 Coincidence 현상이 발생하는 주파수 구간을 제외하고 음향저감 성능이 동일하게 예측되었다. 즉, 유도탄 초기 설계 시에는 일반 잔향실 시험 결과를 구조체의 음향 저감성능을 파악에 활용 가능할 것으로 판단된다.

#### References

- [1] Armel, T. L., "Titan IV Payload Fairing S/N 000036 Acoustics Flat Panel Tests," McDonnell Douglas Aerospace-Space Systems Report MDC 94H0067, July 1994.
- [2] Hughes, W. O. and McNelis, A. M., July 1996, "Cassini/Titan IV Acoustic Blanket Development and Testing," NASA TM-107266, prepared for the 42nd Annual Technical Meeting and Exposition sponsored by the Institute of Environmental Sciences, Orlando, Florida, May 12-16, 1996.
- [3] Lawrence. E. Kinsler and Austin R. Frey, etc, "Fundamentals of Acoustics," John Wiley & Sons, Inc. USA, pp. 333-358, 2000.
- [4] Chongxin Yuan, Otto Bergsma and Adriaan Beukers, "Sound Transmission Loss Prediction of the Composite Fuselage with Different Methods," Application Composite Material, 19:865-883, 2012.
- [5] S. E. Dym and D. C. Lang and J. M. Smith, "Transmission Loss Optimization in Acoustic Sandwich Panels with Orthotropic Cores," Journal of Sound and Vibration. 88, 299-319, 1983.
- [6] Yang-han, Kim, "Lecture Notes on Acoustics," Cmgbooks, Inc. Korea, 2005.